

文章编号:1005-9865(2020)02-0128-07

海底滑坡作用下滩海管道结构安全分析

姜诗源¹, 盛积良^{1, 2}, 陈国明¹, 李新宏¹, 朱红卫¹

(1. 中国石油大学(华东)海洋油气装备与安全技术研究中心, 山东 青岛 266580; 2. 中交海洋建设开发有限公司, 天津 300451)

摘 要:海底滑坡作为常见的海洋地质灾害,对海洋油气工程安全产生巨大威胁。海床土体失稳引起滑坡体滑动,会对海底管道产生拖曳作用。基于计算流体动力学方法(CFD)建立海底滑坡体对管道作用的评估模型,采用 H-B 模型描述块状滑坡体并与试验比较验证,分析不同海床倾斜度滑坡对管道的作用并拟合表达式;研究了海底管道在滑坡作用下的力学响应,并采用极限状态方法开展海底滑坡作用下管道结构极限安全分析,探讨了管道埋地状态时的极限安全界限,建立滑坡作用下管道结构安全分析方法。研究表明:滑坡对管道作用力与海床倾角呈现正相关,而覆土层厚度对作用力影响较小;随着不排水抗剪强度的减小,允许的滑坡宽度和速度均增加,表明土体不排水抗剪强度与引起的拖曳力呈正相关;滑坡土体宽度对极限安全速度影响较大。

关键词:海底管道;海底滑坡;土体失稳;结构安全;安全界限;海床倾角;覆土层厚度

中图分类号:TE52 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2020.02.015

Study on safety limits of the pipelines under submarine glide block

JIANG Shiyuan¹, SHENG Jiliang^{1, 2}, CHEN Guoming¹, LI Xinhong¹, ZHU Hongwei¹

(1. Centre for Offshore Engineering and Safety Technology, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. CCCC International Shipping Corporation, Tianjin 300451, China)

Abstract: Submarine landslide is a common marine geological hazard, which has a great threat to offshore oil and gas engineering. Soil instability leads to mass sliding, which causes drag force on submarine pipelines. A model of the landslide and pipeline was established based on the computational fluid dynamics (CFD) method, and the H-B rheological model was selected to calculate the forces of landslides on the pipelines. The limit state method was used to calculate the safety range of the buried pipeline under the action of submarine landslide, which can be used as a reference for engineering. Submarine landslide, a common marine geological hazard, may severely jeopardize the safety of marine oil and gas engineering. The sliding of landslide caused by the instability of soil in seabed will drag the submarine pipeline. In this study, an evaluation model of effect of submarine landslide on pipeline was developed based on the computational fluid dynamics method. The H-B model was used to describe the massive landslide and compared and verified with the experiment results. The effect of landslides with different seabed slopes on pipeline was analyzed and the expression fitted out. The mechanical response of submarine pipeline under the effect of landslides was also studied and the limit safety analysis of pipeline was presented by using the limit state method. The ultimate safety margin of the buried pipeline is also evaluated to develop the safety analysis method of pipeline under landslide. The results show that the force exerted by landslide on pipeline has a positive correlation to the seabed slope, while the thickness of overburden soil has little effect on the force. The permitted width and velocity of landslide increase with the decrease of undrained shear strength, indicating that the undrained shear strength of soil is positively correlated with the mobilized drag force. And the soil width of landslide induces a greater effect on the ultimate safe speed.

收稿日期:2019-06-04
基金项目:国家重点研发计划课题“临海油气管道及陆上终端风险评估及防控技术”(2016YFC0802305)
作者简介:姜诗源(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为海底管道结构安全分析。E-mail:925773867@qq.com
通信作者:陈国明。E-mail: offshore@126.com

Keywords: submarine pipeline; submarine landslide; soil instability; structural safety; safety range; seabed dip; covering layer thickness

海底滑坡是常见的海洋地质灾害,与陆地相比在海床表面较缓的坡度就有可能发生海底滑坡,滑坡体的滑移距离从几米到几百公里,继续时间最长可达几天。海底滑坡的形成和发展过程主要包括四个阶段,分别是初始阶段(土体失稳形成块状滑坡体)、泥石流阶段(滑坡体与海水掺混发展为泥石流)、混浊流阶段(土、砂石和水进一步发展成浑浊物)及稳定阶段(浑浊物在海床上沉积)^[1]。海底滑坡很有可能破坏沿途管线及其它海底工程设施,造成运输介质的泄漏,引发安全事故,造成海洋环境污染和经济损失^[2]。

近年来国内外在海底滑坡对管道作用方面有较多研究,主要包括模型试验、数值模拟及数学方法等。Zakeri 等^[3-4]通过模型试验及数值模拟,研究了滑动块和连续块对管线的拖曳力与土体不排水抗剪强度的关系,但未考虑海床倾角对拖曳力的影响。Randolph 等^[5]和 White 等^[6]在试验和数值模拟基础上,提出土力学方法,并给出摩擦系数和承载系数的计算公式。李宏伟等^[7]采用 CFD 方法分析了滑坡泥石流对悬跨管道的作用,讨论了悬跨高度对管线法向拖曳系数的影响。王忠涛等^[8-9]在 Zakeri 的试验基础上采用 CFD 方法建立滑坡管道模型,从土力学角度分析了雷诺数与阻力系数的关系,研究了管道截面、悬跨高度、冲击角度等因素对管道阻力系数的影响,对海底选址和海底管线设计具有指导意义。

目前在海底滑坡对管道影响方面的研究多数集中在滑坡碎屑流和混浊流阶段,初期块状体阶段研究较少。鉴于此,采用计算流体力学方法,以 H-B 模型描述滑坡体,对海底滑坡初期块状滑坡体对管道作用力进行研究,考虑到工程实际应用的便捷性,简化了海床倾角与作用力之间复杂的系数关系,拟合出不同海床倾斜度对管道作用力的公式,计算了海底滑坡作用下管道结构安全界限,建立滑坡作用下管道结构安全分析方法,该方法对保障服役管道安全运行具有一定的参考价值。

1 滑坡与管道作用数学模型

1.1 水和滑坡体控制方程

海底滑坡过程包括水和滑坡土体的两相流动,采用 CFD 多相流体积法进行计算,海底滑坡过程遵循连续性方程和动量方程。

1) 连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_1\rho_1) + \nabla \cdot (r_1\rho_1 U_1) = M_{MS_1} + \sum_{\beta=1}^2 \Gamma_{12} \tag{1}$$

式中: r_1, ρ_1 和 U_1 为第 1 相的体积分数、密度和速度; M_{MS_1} 为指定质量源相; Γ_{12} 为第 2 相到第 1 相单位体积质量流率,实际运用中需遵循 $\Gamma_{12} = -\Gamma_{21} \Rightarrow \sum_{\beta=1}^2 \Gamma_{12} = 0$ 。当 $\Gamma_{12} = \Gamma_{12}^+ - \Gamma_{21}^+ > 0$ 时,表示第 1 相到第 2 相的单位体积质量流率为负, $\sum_{\alpha=1}^2 r_1 = 1$ 。

2) 动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(r_1\rho_1 U_1) + \nabla \cdot (r_1(\rho_1 U_1 \otimes U_1)) = & -r_1 \nabla P_1 + \nabla \cdot (r_1\mu_1(\nabla U_1 + (\nabla U_1)^T)) + \\ & \sum_{\beta=1}^2 (\Gamma_{12}^+ U_2 - \Gamma_{21}^+ U_1) + S_{M_1} + M_1 \end{aligned} \tag{2}$$

式中: P_1 和 μ_1 为第 1 相的压强和黏性系数; S_{M_1} 为外质量力引起的动量源相; M_1 是由于其它相引起的作用在第 1 相上的总界面力,由拖曳力、升力、壁面湿润力和湍流耗散力等组成。

1.2 滑坡体流变本构模型

Herschel-Bulkley 流变模型能够较为准确地描述块状滑坡土体^[3],作为不可压缩非牛顿流体,块状土体剪切应力采用 Herschel-Bulkley 模型张量型式,可由公式(3)表示。

$$\overline{\tau} = \overline{\tau}_c + \eta \times \overline{D} \tag{3}$$

式中: $\overline{\tau}_c$ 为屈服剪切应力; η 为动力黏度, η 与 $\overline{D}$ 有关,且:

2.2 模型分析与验证

Zakeri 通过试验^[1]得到海底滑坡土体垂直冲击管道的作用力,公式(6)为单位长度管道受到的拖曳力。

$$F_D = k \times S_u \times D \tag{6}$$

式中: S_u 为不排水抗剪强度; D 为管道直径; k 为模型参数,由剪切应变率确定,Zakeri 拟合得到表达式为: $k = 7.5 \times \dot{\gamma}^{0.12}$ 。

根据数值模拟结果,采用式(6)计算得出参数 k ,绘制剪切应变率与参数 k 关系,如图 4 所示。为验证数值模型的正确性,假设数值模拟结果拟合得到 k 的表达式与 Zakeri 试验得到的一致,拟合得出相关系数 R^2 ;分别取数值模拟的各组值与试验拟合表达式的值进行计算,计算得到 $R^2 = 0.847$,与试验的拟合表达式相关性较好,因此可以验证本文建立的模型能够较好地模拟滑坡体对管道的作用,对数据拟合得到表达式:

$$F = 7.33u^{0.126}D^{0.874}S_u \tag{7}$$

式中: u 表示滑坡速度, F 为管道作用力。

2.3 海床倾角与覆土厚度影响分析

发生海底滑坡的角度范围多数为 $0^\circ \sim 5^\circ$ ^[5],滑坡土体经过管道时,管道上方的土体厚度也是影响滑坡对管道作用的因素,因此将海床倾斜度及管道上覆土厚度引入数值模拟中。

对数值模型进行修改,分别将海床倾斜角设为: 0.5° 、 1° 、 2° 、 3° 和 5° ,流体流动方向与海床方向平行,管径范围为 $0.1 \sim 0.45$ m,设置土体运动速度范围为 $0.04 \sim 1.3$ m/s,不排水抗剪强度为 8 kPa,其余设置不变。分别设置不同海床倾斜角度、流速与管径的组合,每个海床倾角与流速和管径组成 7 个组合,当作用力数值趋于稳定时,将竖向合力减去覆土压力,计算合力及合力方向,定义与海床方向平行向下的方向为负方向,向上为正方向,具体计算结果见表 1。

为了分析海床倾斜角度与作用力之间的关系,按组绘制散点图,如图 5 所示。从图 5 可以看出,海床倾角在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 范围内时,随着海床倾角的增加,作用力增加幅度较少,但仍呈现出增长状态;从力的方向来看,作用力方向与海床夹角处于较小的范围,因此合力方向可近似与海床的方向一致;每组模拟管道覆土高度值有差异,但对合力及合力方向影响较小。

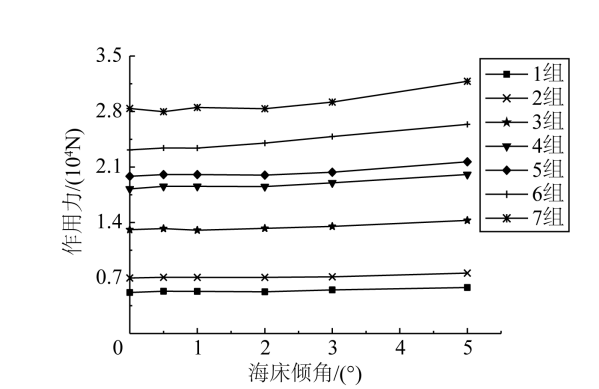


图 5 海床倾角与作用力关系

Fig. 5 Relationship between the dip angle and the force

对 7 组数据进行处理,同时除以海床倾角为 0° 时作用力数值,绘制散点图见图 6,将得到的数据进行拟合,得到表达式为 $f(\alpha) = 17.5 \times (\sin\alpha)^{2.1} + 1$,如图 6 所示,拟合曲线与各样本点具有良好的相关性,将 $f(\alpha)$ 乘以倾角为 0° 时作用力数值,则海床倾斜度为 α 时滑坡对管道的作用力的表达式为:

$$F = 7.33u^{0.127}D^{0.873}S_u [17.5 (\sin\alpha)^{2.1} + 1] \tag{8}$$

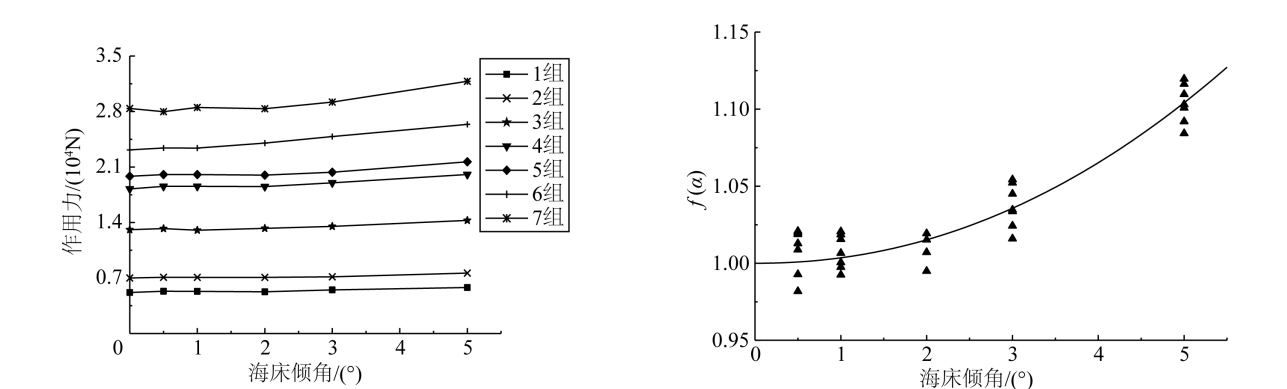


图 6 海床倾角与作用力关系拟合曲线

Fig. 6 Relationship between the dip angle and the force

表 1 数值模拟结果

Tab. 1 Statistics of numerical simulation results

组号	海床倾角/(°)	直径/m	滑坡流速/(m·s ⁻¹)	作用力/N	力与海床夹角/(°)
1	0.0	0.1	0.04	5 276.8	0.000 14
	0.5	0.1	0.04	5 327.9	0.000 14
	1.0	0.1	0.04	5 305.7	0.000 14
	2.0	0.1	0.04	5 261.4	0.000 14
	3.0	0.1	0.04	5 497.3	0.000 14
	5.0	0.1	0.04	5 797.2	0.000 14
2	0.0	0.1	0.4	7 032.1	1.236 32
	0.5	0.1	0.4	7 093.2	1.234 23
	1.0	0.1	0.4	7 077.3	1.157 32
	2.0	0.1	0.4	7 081.2	1.043 24
	3.0	0.1	0.4	7 143.7	1.050 81
	5.0	0.1	0.4	7 623.7	1.149 16
3	0.0	0.25	0.1	13 217.5	1.564 32
	0.5	0.25	0.1	13 228.3	1.546 68
	1.0	0.25	0.1	13 028.4	1.245 15
	2.0	0.25	0.1	13 259.6	1.142 72
	3.0	0.25	0.1	13 513.2	1.073 43
	5.0	0.25	0.1	14 262.2	1.163 45
4	0.0	0.25	1.3	18 631.2	1.446 53
	0.5	0.25	1.3	18 561.9	1.437 63
	1.0	0.25	1.3	18 557.7	1.396 76
	2.0	0.25	1.3	18 533.8	1.337 83
	3.0	0.25	1.3	19 001.3	1.436 83
	5.0	0.25	1.3	20 056.5	1.376 22
5	0.0	0.3	0.7	20 062.3	-0.240 14
	0.5	0.3	0.7	20 047.3	-0.242 41
	1.0	0.3	0.7	20 042.7	-0.521 88
	2.0	0.3	0.7	19 976.4	-0.444 75
	3.0	0.3	0.7	20 338.0	-0.461 53
	5.0	0.3	0.7	21 660.7	-0.551 48
6	0.0	0.35	1	23 413.8	1.301 48
	0.5	0.35	1	23 394.5	1.260 48
	1.0	0.35	1	23 387.2	1.159 66
	2.0	0.35	1	24 018.4	1.148 64
	3.0	0.35	1	24 843.8	1.213 43
	5.0	0.35	1	26 382.0	1.076 30
7	0.0	0.45	0.8	27 879.1	0.980 58
	0.5	0.45	0.8	27 979.1	0.960 58
	1.0	0.45	0.8	28 512.9	0.949 21
	2.0	0.45	0.8	28 353.0	0.922 21
	3.0	0.45	0.8	29 189.7	0.921 08
	5.0	0.45	0.8	31 811.5	0.893 93

图 8 管道极限安全界限

Fig. 8 Safty limits of pipeline under submarine landslide

从图 8 中可知,随着滑坡土体宽度增加,允许的极限安全速度随之减小;随着不排水抗剪强度的减小,允许的滑坡宽度和速度均增加,这是由于土体不排水抗剪强度与引起的拖曳力呈正相关;通过分析得出悬跨状态的管道受到滑坡作用影响较大,因此在海底发生地质灾害时,局部悬跨段管道应当重点关注。

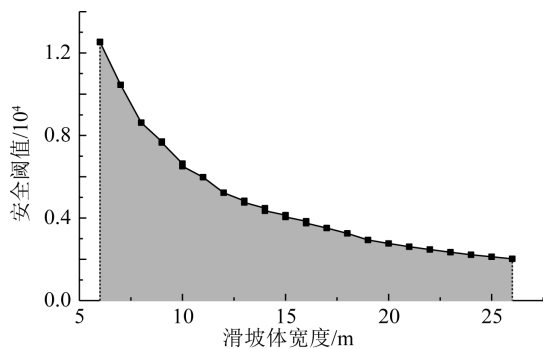


图 9 滑坡作用下悬跨管道结构安全界限

Fig. 9 Safety range of submarine pipeline structure under landslide

为了能更直观地将安全界限的形式表示出来,以埋地状态为例对数据进行处理,定义 S 为安全阈值:

$$S = u^{0.127} \times S_u \quad (9)$$

整理后,得到滑坡作用下海底管道结构安全界限,如图 9 所示。从图 9 可以看出,随着滑坡体宽度的增加,安全阈值随之减小,即不排水抗剪强度 S_u 一定时,允许的最大移动速度越来越小,以此可作为海底管道在滑坡作用下的结构安全判定依据。采集海底管道附近的海床土壤,由流变仪可测出土体的不排水抗剪强度,借助相应的滑坡监测技术如侧扫声纳和浅地层剖面系统,可对海底滑坡作用下管道结构安全做出判断进而做出预警。

4 结 语

1) 针对海底滑坡初始阶段对管线的作用,利用计算流体动力学方法进行了数值模拟,滑坡体垂直冲击管道的数值模拟结果与试验结果相关性较好,验证了数值模型准确性;

2) 计算了不同海床倾斜度对滑坡体作用力的影响,通过计算可知管道覆土厚度对作用力影响较小,拟合出含海床倾角的海底滑坡对管道作用力公式;

3) 针对海底管道在滑坡作用下的力学响应,计算了管道埋地状态时的安全界限,建立了海底滑坡作用下管道极限状态安全分析方法,为工程中管道安全分析提供参考。

参考文献:

- [1] 李家钢,修宗祥,申宏,等. 海底滑坡块体运动研究综述[J]. 海岸工程, 2012, 31(4): 67-78. (LI Jiagang, XIU Zongxiang, SHEN Hong, et al. A review of the studies on submarine mass movement[J]. Coastal Engineering, 2012, 31(4): 67-78. (in Chinses))
- [2] 李新宏,朱红卫,陈国明,等. 海底油气管道泄漏事故风险分析的贝叶斯动态模型[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(4): 75-80. (LI Xinhong, ZHU Hongwei, CHEN Guoming, et al. Bayesian dynamic model for analyzing risk of meeting submarine oil & gas pipeline leakage accident[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(4): 75-80. (in Chinses))
- [3] ZAKERI A, HAWLADER B. Drag forces caused by submarine glide block or out-runner block impact on suspended (free-span) pipelines—Numerical analysis[J]. Ocean Engineering, 2013, 67: 89-99.
- [4] ZAKERI A, HAWLADER B, CHI K. Drag forces caused by submarine glide block or out-runner block impact on suspended (free-span) pipelines[J]. Ocean Engineering, 2012, 47: 50-57.
- [5] RANDOLPH M F, WHITE D J. Interaction forces between pipelines and submarine slides—A geotechnical viewpoint[J]. Ocean Engineering, 2012, 48: 32-37.
- [6] WHITE F M, CORFIELD I. Viscous fluid flow[M]. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2006.
- [7] 李宏伟,王立忠,国振,等. 海底泥流冲击悬跨管道拖曳力系数分析[J]. 海洋工程, 2015, 33(6): 10-19. (LI Hongwei, WANG Lizhong, GUO Zhen, et al. Drag force of submarine landslides mudflow impacting on a suspended pipeline[J]. The Ocean Engineering, 2015, 33(6): 10-19. (in Chinses))
- [8] 王忠涛,张宇,杨庆,等. 海底滑坡对管线冲击力的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(3): 567-573. (WANG Zhongtao, ZHANG Yu, YANG Qing, et al. Numerical analysis of impact force of submarine landslide on pipeline[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3): 567-573. (in Chinses))
- [9] 王忠涛,王寒阳,张宇. 海底滑坡对置于海床表面管线作用力的 CFD 模拟[J]. 海洋学报, 2016, 38(9): 110-117. (WANG Zhongtao, WANG Hanyang, ZHANG Yu. CFD simulation of the force acting on the surface of seabed landslide[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(9): 110-117. (in Chinses))